

М.Ю. Семенов

## Кислотные выпадения на территории Сибири

*Лимнологический институт СО РАН, г. Иркутск*

Поступила в редакцию 27.11.2001 г.

С целью детализации полученной ранее в масштабе 1:10 000 000 картины пространственного распределения величин современной и допустимой кислотных нагрузок и проверки отмеченных тенденций для территорий Западной Бурятии и юго-западного Прибайкалья составлены карты масштаба 1:1 500 000. Подтверждены различия в величинах нагрузок и ионном составе атмосферных выпадений между равнинными и горными районами. Рассмотрены закономерности распределения величин допустимых нагрузок в условиях вертикальной поясности.

### Введение

В последние несколько десятков лет в связи с интенсификацией хозяйственной деятельности человека среди множества других особое значение приобрела проблема кислотных выпадений. Благодаря климатическим особенностям опасность подкисления природных сред и проявления связанных с ним неблагоприятных эффектов наиболее велика для экосистем северного полушария. В рамках Международной конвенции по трансграничному переносу атмосферных загрязнителей для стран Европы составлены карты пространственного распределения величин критических нагрузок по кислотности и конкретным видам загрязнителей. В России до сих пор более или менее изученной в этом плане остается ее европейская часть.

Ранее нами [1–4] уже были составлены карты пространственного распределения величин выпадений кислотных и основных компонентов атмосферных осадков, современной кислотной нагрузки и критических нагрузок кислотности на территорию азиатской части России. Настоящее исследование представляет собой очередной шаг в детализации картин распределения кислотной нагрузки на территории Сибири и устойчивости экосистем к подкислению и имеет целью, помимо общей характеристики ситуации, отработать методику исследований как в региональном, так и в локальном масштабах. На данном этапе оценивались современный уровень кислотной нагрузки и допустимый предел ее увеличения, обусловленный чувствительностью наземных экосистем. В качестве меры чувствительности (устойчивости) экосистем к подкислению использовалась величина допустимой (критической) нагрузки (CL(Ас)), т.е. максимальное количество кислотных выпадений, не вызывающее в течение длительного времени химических изменений, сопровождающихся вредным воздействием на экосистему [5].

### Объекты исследования

Объектами исследования в региональном масштабе служили лесные экосистемы азиатской части России, в локальном – экосистемы равнинной части Западной Сибири и горные экосистемы Алтайского края, экосистемы

горных лесов Восточного Саяна и экосистемы Западного Прибайкалья.

### Методы исследования

*Атмосферные выпадения.* Большая часть данных по качественному и количественному составу атмосферных выпадений взята из литературных источников [6–8]. Данные по Байкальскому региону получены сотрудниками лаборатории гидрохимии и химии атмосферы ЛИИ СО РАН. Поступление вещества в экосистемы из атмосферы рассчитывалось нами на основе данных о химическом составе снеговых вод и некоторых климатических данных. Для того чтобы исключить «нейтральные» морские соли из баланса кислотности, из выпадений каждого элемента была вычтена его «морская доля», рассчитанная по отношению соответствующего элемента к натрию в морской воде. При расчете величин выпадений подкисляющих соединений учитывались и выпадения аммония, попадая в почву, он полностью нитрифицируется, продуцируя один протон водорода на каждый ион.

Таким образом, выражение величины современной кислотной нагрузки имело вид

$$H_{\text{вып}}^+ = \text{SO}_{4\text{вып}}^{2-*} + \text{NO}_{x\text{вып}}^{y-} + \text{Cl}_{\text{вып}}^- + \text{NH}_4^+ - \text{Ca}_{\text{вып}}^{2+*} - \text{Mg}_{\text{вып}}^{2+*} - \text{K}_{\text{вып}}^+, \quad (1)$$

где  $H_{\text{вып}}^+$  – современная кислотная нагрузка и  $\text{SO}_{4\text{вып}}^{2-}$ ,  $\text{NO}_{x\text{вып}}^{y-}$ ,  $\text{Cl}_{\text{вып}}^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Ca}_{\text{вып}}^{2+}$ ,  $\text{Mg}_{\text{вып}}^{2+}$ ,  $\text{K}_{\text{вып}}^+$  – выпадения соответствующих компонентов, звездочкой обозначены «скорректированные» величины выпадений.

*Критические нагрузки.* Величины критических нагрузок рассчитывались при помощи биогеохимической модели PROFILE [9]. В качестве входных использовались параметры биологического круговорота, физического и химического состояния почв и атмосферы.

### Атмосферные выпадения

*Основные компоненты.* Полученная нами картина пространственного распределения величин атмосферных выпадений катионов  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^{2+}$  дает основание пред-

полагать направленный атмосферный перенос эоловых частиц из районов, подверженных ветровой эрозии, – сельскохозяйственных районов ЕТС, степной и лесостепной зон ЕТС и АТС и пустынь и полупустынь Средней Азии. Величины суммарного поступления физиологически активных катионов варьируют от 0,05 до 1,30 экв·га<sup>-1</sup>·год<sup>-1</sup>. Максимальные величины выпадений отмечены в пределах южнотаежной и лесостепной зон Западной Сибири, минимальные – практически на всем протяжении тундровой зоны, за исключением территорий близ Северного Урала. На территории восточнее Среднесибирского плоскогорья низкие величины выпадений физиологически активных катионов «спускаются» к зоне южной тайги. Особо следует отметить вытягивание изолиний выпадений вдоль линии Транссибирской железнодорожной магистрали.

**Кислотные компоненты.** Пространственные закономерности распределения выпадений кислотных компонентов атмосферных осадков во многом совпадают с закономерностями распределения выпадений катионов щелочных и щелочноземельных металлов. Основные отличия заключаются в локализации высоких величин выпадений и градиенте пространственного распределения величин выпадений. Если в пользу эолового происхождения выпадений катионов говорят их четкая локализация и небольшая площадь распространения, то в пространственном распределении кислотных компонентов наблюдаются отсутствие четкой привязки к определенным географическим объектам, некоторая «размытость» очертаний контуров высоких величин выпадений, их большая протяженность как в широтном, так и в меридиональном направлениях, которые мы, как и в случае с пространственным распределением основных компонентов, связываем со спецификой агрегатного состояния соединений, в данном случае – газового. Наибольшие величины выпадений (до 1,30 экв·га<sup>-1</sup>·год<sup>-1</sup>) кислотных компонентов также приурочены к территориям Южного и Среднего Урала, южнотаежной зоне Западной Сибири и территории Приморского края, а наименьшие отмечены в тундровой зоне, подзонах северной и средней тайги в пределах Якутии, Магаданской области и Чукотки.

**Современная кислотная нагрузка.** Картирование результатов расчетов величин суммарных атмосферных выпадений показало преобладание на большей части территории в составе выпадений сильных кислотных анионов и аммония над катионами щелочных и щелочноземельных металлов.

В пределах тундровой и таежной зон величины современной кислотной нагрузки  $H_{\text{вып}}^+$  составляют 0,1–0,5 экв·га<sup>-1</sup>·год<sup>-1</sup>, причем налицо снижение величин в направлении с юга на север и с запада на восток. Наибольшие величины избытка кислотных компонентов над основными (0,5 экв·га<sup>-1</sup>·год<sup>-1</sup>) наблюдаются на юге Западной Сибири, далее на север – к полярному кругу – и на восток – к Якутии – величины потенциальной кислотности снижаются до 0,1 экв·га<sup>-1</sup>·год<sup>-1</sup>. Иначе дело обстоит в лесостепной зоне и зоне широколиственных лесов, где наблюдается обратная картина – преобладание основных компонентов атмосферных выпадений над кислотными, а величины  $H_{\text{вып}}^+$  достигают отрицательных величин – до –0,5 экв·га<sup>-1</sup>·год<sup>-1</sup>.

С целью детализации картины распределения величин современной кислотной нагрузки и проверки тенденций, отмеченных нами на картах масштаба 1 : 10 000 000, по данным снеговосъемок нами были также составлены для территорий Западной Бурятии и Прибайкалья карты масштаба

1 : 1 500 000. Величины современной кислотной нагрузки на территорию Западной Бурятии варьируют от –0,10 до 0,40 экв·га<sup>-1</sup>·год<sup>-1</sup> (рис. 1).

Наименьшие величины отмечены в восточной оконечности Тункинской котловины, которая, по-видимому, испытывает влияние переноса подщелачивающих соединений с территории Иркутско-Черемховской промышленной агломерации. Отрицательные значения величин современной кислотной нагрузки отмечаются также на отдельных участках вдоль автодороги Култук – Монды. Мы связываем это с хозяйственной деятельностью человека, поскольку наибольшая плотность населения приурочена именно к зоне автодороги.

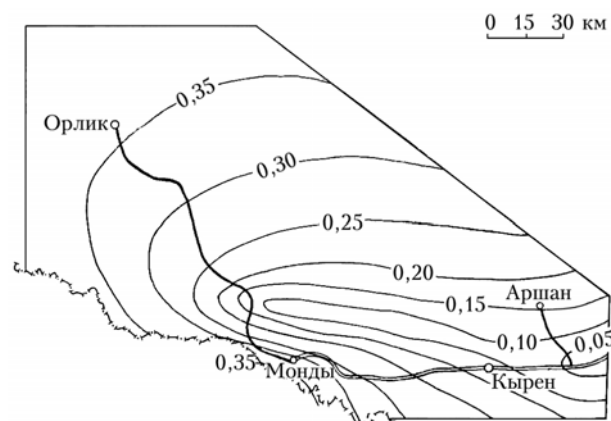


Рис. 1. Современная кислотная нагрузка на территорию Западной Бурятии, экв·га<sup>-1</sup>·год<sup>-1</sup>

Следует учитывать и то обстоятельство, что южная часть Тункинской котловины сложена карбонатными породами, вскрытие которых в результате хозяйственных мероприятий, возможно, также вносит свой вклад в локальные явления видимого резкого снижения протонной нагрузки. Максимальные величины выпадений кислотообразующих поллютантов характерны для высокогорных районов. С одной стороны, это обусловлено большим количеством осадков, с другой – особенностями их ионного состава. В высокогорной зоне юга исследованной территории среди анионов преобладают сульфат-ионы (до 72%-экв. от суммы), а среди катионов – ионы водорода (до 85%-экв.). В северном направлении доля сульфат-иона уменьшается, за счет чего увеличивается доля хлорид-иона (до 80%-экв. от суммы анионов). Тенденция замещения сульфат-иона хлорид-ионом также прослеживается при увеличении абсолютной высоты местности на фоне снижения общей минерализации осадков.

Величины современной кислотной нагрузки на почвы юго-западного Прибайкалья, как и в Западной Бурятии, варьируют от –0,10 до 0,35 экв·га<sup>-1</sup>·год<sup>-1</sup> (рис. 2).

Эта территория также испытывает влияние Иркутско-Черемховской промышленной агломерации, что отчетливо просматривается в сгущении изолиний в направлении с юго-востока на северо-запад. Именно в районе Иркутска величина кислотной нагрузки достигает отрицательных значений. В южном – севернее пос. Листвянка – и восточном – на юго-восточном макросклоне Приморского хребта в районе о. Ольхон – направлениях величины кислотной нагрузки увеличиваются до 0,35 и 0,25 экв·га<sup>-1</sup>·год<sup>-1</sup> соответственно. Как и в Бурятии, наибольшие величины  $H_{\text{вып}}^+$  приурочены здесь также к наиболее высоким местоположе-

ниям (высокогорной зоне Приморского хребта), с той лишь разницей, что кроме сульфат-иона в анионном составе выпадений в значительных количествах присутствует нитрат-ион (30–50%-экв. от суммы анионов), а доля хлорид-иона незначительна. В составе катионов зачастую велика доля кальция (в некоторых местах – до 40%-экв.).

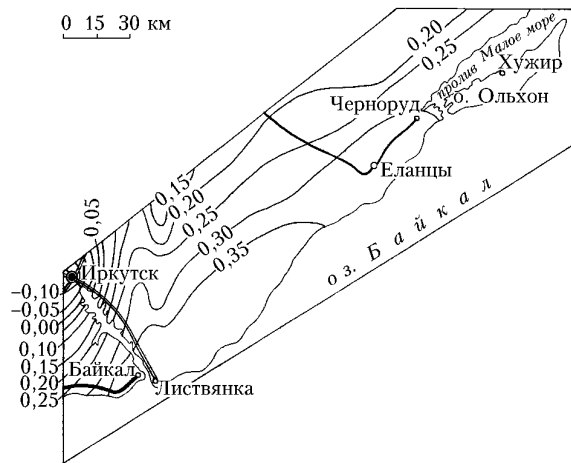


Рис. 2. Современная кислотная нагрузка на территорию юго-западного Прибайкалья,  $\text{кэкв}\cdot\text{га}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}$

### Допустимые кислотные нагрузки

Благодаря огромному разнообразию экологических условий Сибири и Дальнего Востока величины критических нагрузок по кислотности варьируют на исследованной территории в очень широких пределах – от 0 до  $7 \text{ кэкв}\cdot\text{га}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}$ .

Большая часть территории с величинами критических нагрузок, находящихся в пределах от 0 до  $2 \text{ кэкв}\cdot\text{га}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}$ , лежит между 75-й и 60-й параллелями (исключением является территория Забайкалья) и образует пояс, который примерно соответствует зонам арктической пустыни, тундры, лесотундры, а также северотаежной и, частично, среднетаежной подзоны; остальная часть приходится на те высотные пояса горных областей, почвы и экосистемы которых коррелируют с соответствующими вышеперечисленными равнинными зонами.

Пояс значений нагрузок от 2 до  $5 \text{ кэкв}\cdot\text{га}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}$  находится между 60-й и 50-й параллелями, причем в меридиональном направлении (с севера на юг) он довольно четко делится на три сменяющие друг друга зоны: 1)  $2\text{--}3 \text{ кэкв}\cdot\text{га}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}$ , 2)  $3\text{--}4 \text{ кэкв}\cdot\text{га}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}$  и 3)  $4\text{--}5 \text{ кэкв}\cdot\text{га}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}$ . Необходимо отметить, что две последние зоны в отличие от первой не имеют сплошного распространения, а делятся на три основные области: а) Западно- и Средне-Сибирскую южнотаежную, б) Центрально-Якутскую северотаежную и в) Дальневосточную область широколиственных лесов. Территории со значениями нагрузок от 5 до  $6 \text{ кэкв}\cdot\text{га}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}$  и более не образуют единого пояса (области) и расположены отдельными ареалами на юге Западной Сибири и Дальнего Востока.

В целом величины нагрузок закономерно нарастают с уменьшением широты местности. Особенно это справедливо для равнинных территорий. Так, на территории юга Западной Сибири наиболее устойчивыми к кислотным выпадениям являются экосистемы южнотаежных мелколиственных и хвойно-мелколиственных лесов на подзолистых и

серых лесных почвах ( $\text{CL}(\text{Ac})$  до  $6 \text{ кэкв}\cdot\text{га}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}$ ). Наименее устойчивы экосистемы среднетаежных светловодных лесов на подзолистых и глеевато-таежных почвах ( $\text{CL}(\text{Ac}) = 1\text{--}2 \text{ кэкв}\cdot\text{га}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}$ ).

При движении на восток появляются довольно значительные территории, на которых вышеозначенная закономерность не соблюдается. Это связано с увеличением доли горных экосистем и площадей их высокогорных поясов в восточном направлении.

Критические нагрузки по кислотности на территории западной части Республики Бурятия (рис. 3) варьируют от 1,25 до  $14 \text{ кэкв}\cdot\text{га}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}$ .

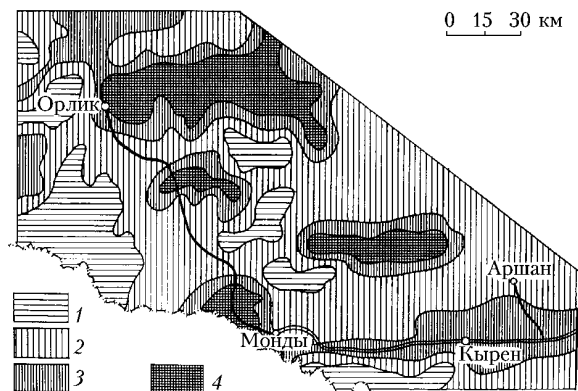


Рис. 3. Допустимые нагрузки кислотности  $\text{CL}(\text{Ac})$  на экосистемы Западной Бурятии,  $\text{кэкв}\cdot\text{га}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}$ : 1 –  $<1$ ; 2 –  $1\text{--}2$ ; 3 –  $2\text{--}3$ ; 4 –  $>3$

Наибольшие величины нагрузок характерны для различных по видовому составу лесных экосистем на перегнойно-карбонатных почвах, наименьшие – для экосистем подгольцовых лиственничных, лиственнично-сосновых и сосновых редколесий на горных подбурях, горных дерновых кислых и горных тундровых почвах. На горной территории отчетливо видна вертикальная смена поясов, характеризующихся различной устойчивостью: от наибольшей внизу до наименьшей вверху. На территориях, сложенных карбонатными породами, подобные закономерности не прослеживаются. На участках, где карбонатные породы отсутствуют, величина критической нагрузки в наибольшей мере зависит от величины ежегодного возврата основных элементов минерального питания с опадом, т.е. от величины ежегодной продукции и, соответственно, от продуктивности растительных сообществ. Именно с этим связано возрастание величин нагрузок с понижением высоты над уровнем моря в восточной части Тункинской котловины. Помимо видового состава растительности высокая продуктивность растительных сообществ восточной части котловины обусловлена богатством почв слабовыветрелыми минералами и благоприятным гидротермическим режимом.

Пространственные закономерности распределения величин критических нагрузок на территории Прибайкалья (рис. 4) в общих чертах схожи с таковыми, выявленными в Западной Бурятии, с той лишь разницей, что здесь на большей части территории преобладают предгорные и низкогорные экосистемы и высотная дифференциация экосистем, различных по устойчивости к подкислению, по-настоящему проявляется лишь в пределах узкой полосы Приморского хребта. Далее, в направлении на север и на запад, устойчивость почв и экосистем к кислотным нагрузкам определяется уже больше геологическим строением и общей интенсивностью биогеохимических процессов.

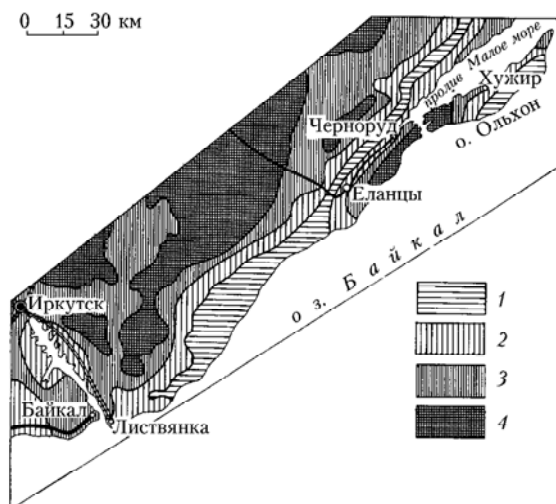


Рис. 4. Допустимые нагрузки кислотности CL(As) на экосистемы юго-западного Прибайкалья,  $\text{кг экв-га}^{-1}\cdot\text{год}^{-1}$ : 1 – <1; 2 – 1–2; 3 – 2–3; 4 – >3

### Превышения критических нагрузок

Приблизительно превышения критических нагрузок по кислотности были оценены по формуле

$$\text{Превышение} = \text{H}_{\text{вып}}^+ - \text{CL}(\text{Ac}). \quad (2)$$

Для абсолютного большинства экосистем, занимающих более 90% площади тундровой и таежной зон Сибири, получены отрицательные величины превышений, что свидетельствует об отсутствии возможности

#### *M.Yu. Semenov. Acidic depositions on the territory of Siberia.*

For the further development of an existing picture of acidification in Siberia, the maps of the present and the permissible acidity loads on West Buryatia and South-West Pribaikalie are drawn. On the base of chemical composition and deposition values the observed earlier differences between the mountains and plain regions are confirmed. The regularity of permissible loads distribution in highland areas are discussed.

подкисления и связанных с ним неблагоприятных последствий при современном уровне атмосферных выпадений. Величины  $\text{H}_{\text{вып}}^+$  и CL(As) наиболее близки друг к другу в поясах верхней и средней тайги Восточного Саяна и Забайкалья.

1. *Semenov M.Yu., Bashkin V.N., Sverdrup H.* Application of Bio-geochemical Model «PROFILE» for Assessment of North Asian Ecosystem Sensitivity to Acid Deposition // *Asian Journal of Energy and Environment*. 2000. № 2. P. 143–162.
2. *Semenov M., Bashkin V., Sverdrup H.* Critical Loads of Acidity for Forest Ecosystems of North Asia // *Water, Air, and Soil Pollut.* 2001. V. 130. № 1–4. P. 1193–1198.
3. *Семенов М.Ю., Башкин В.Н.* Оценка устойчивости экосистем Западной Сибири к кислотным выпадениям // *Геогр. и природ. ресурсы*. 1999. № 4. С. 44–52.
4. *Семенов М.Ю., Нецветова О.Г., Кобелева Н.А., Ходжер Т.В.* Современная и допустимая кислотные нагрузки на территорию азиатской части России // *Оптика атмосф. и океана*. 2001. Т. 14. № 6–7. С. 499–504.
5. *Nilsson J., Grennfelt P.* Critical loads for sulfur and nitrogen: Report from a workshop held at Stokloster, Sweden, 19–24 March, 1988: *NORD Miljorapport*. Copenhagen: Nordic Council of Ministers, 1988. V. 15. 418 p.
6. *Ломоносов И.С., Макаров В.Н., Хаустов А.П. и др.* Экогеохимия городов Восточной Сибири. Якутск: Ин-т мерзлотоведения СО РАН, 1993. 108 с.
7. *Макаров В.Н., Федосеев Н.Ф., Федосеева В.И.* Геохимия снежного покрова Якутии. Якутск: Ин-т мерзлотоведения СО АН СССР, 1990. 152 с.
8. *Черняева Л.Е., Черняев А.М., Могиленских А.К.* Химический состав атмосферных выпадений (Урал и Уральский район). Л.: Гидрометеиздат, 1978. 177 с.
9. *Warfvinge P., Sverdrup H.* Critical Loads of Acidity to Swedish Forest Soils: Methods, Data and Results. Lund, Sweden, 1995. 104 p.